



SUOMI – FINLAND
(FI)

PATENTTI- JA REKISTERIHALLITUS
PATENT- OCH REGISTERSTYRELSEN

(12) EUROOPAN PATENTTIJULKAISUN KÄÄNNÖS
ÖVERSÄTTNING AV EUROPEISK PATENTSKRIFT

(10) FI/EP0966689 T3

(45) Käännöksen kuul. pvm - Övers. kungörelsedag 31.01.2002

(80) Euroopan patentin myöntämispäivä -
Meddelandedatum för det europeiska patentet 19.09.2001

(51) Kv.lk.7 - Int.kl.7

G01R 33/035, 33/022

(86) Euroopan patentihakemus - Europeisk patentansökan EP98910840.2

(86) (24) Alkupäivä - Löpdag 06.03.1998

(87) EP-hakemuksen julkiseksi tulo pvm -
EP-ansökans publiceringsdag 29.12.1999

(86) Kv. hakemus - Int. ansökan PCT/GB9800685

(30) Etuoikeus - Prioritet

10.03.1997 GB 9704911

(73) Haltija - Innehavare

1 •QinetiQ Limited, 85 Buckingham Gate, London, SW1 6TD, ISO-BRITANNIA, (GB)

(72) Keksijä - Uppfinnare

1 •KEENE, Mark, Nicholas, c/o Dera, Malvern St. Andrews Road, Malvern Worcs. WR14 3PS, ISO-BRITANNIA, (GB)

2 •SATCHELL, Julian, Simon, c/o Dera, Malvern St. Andrews Road, Malvern Worcs. WR14 3PS, ISO-BRITANNIA, (GB)

(74) Asiamies - Ombud: Berggren Oy Ab
Jaakonkatu 3 A, 00100 Helsinki

(54) Keksinnön nimitys - Uppfinningens benämning

Magneettinen gradiometri
Magnetisk gradiometer

(56) Viitejulkaisut - Anförda publikationer

THIS PAGE BLANK (USPTO)

Magneettinen gradiometri – Magnetisk gradiometer

Keksintö liittyy laitteeseen, jolla mitataan magneettista kenttäinformaatiota, ja sitä voidaan käyttää erityisesti magneettikentän gradienttikomponenttien määrittämiseen.

- 5 Järjestelmää voidaan käyttää luokkaa 100 fTm^{-1} olevien magneettikentän gradienttien ilmaisemiseen liikkuvalla alustalla maan magneettikentän (likimäärin $70 \mu\text{T}$) taustaa vasten.

- 10 SQUID-magnetometrit (SQUID, superconducting quantum interference devices; suprajohdavat kvantti-interferenssilaitteet) ovat erittäin herkkiä laitteita, jotka pystyvät mittaamaan magneettikentän vektorikomponentteja, jotka ovat niinkin pieniä kuin 10^{-9} kertaa maan ympäristökenttä. Magneettikenttien mittaus lähellä herkkyyssynnystä maan magneettikentän mukana ollessa tuottaa monia vaikeuksia. Esimerkiksi geomagneettinen kohina ja ihmisen tuottama kohina ovat aina hallitsevia. Lisäksi elleivät SQUIDit ole jäykästi asennetut, pienetkin liikkeet maan magneettikentässä kuvautuvat ulostulossa isoina muutoksina, ja siksi on usein hyödyllisempää ilmaista gradientti magneettikentässä eikä itse magneettikenttää.
- 15

- Magneettikentän gradientti voidaan mitata käyttäen itseisjohtavaa SQUID-gradiometriä. Itseisjohtavassa SQUID-gradiometrissä on ilmaisukelat, jotka on tehty kahdesta silmukasta, jotka on yhdistetty napaisuudeltaan vastakkaisina. Tällaisessa koonpanossa ilmaisukelojen täytyy olla hyvin balansoidut ja kohdennetut, ja pienet osamuutokset kunkin kelan tehollisessa koossa tai orientaatioissa tuottavat epätasaisista magneettikentistä lähtösignaaleja, joita ei voi erottaa todellisista gradienteista. Balansointi toteutetaan tavallisesti asettelulla erityisissä kalibrointilaitteistoissa laboratorio-olosuhteissa, ja se on kallis aikaa vievä menetelmä. Lisäksi koska ilmaisiin tulee suuri taustakenttä, rakenteeseen indusoituu virtoja, jotka aiheuttavat $1/f$ -kohinaa ja voivat aiheuttaa hystereesiongelmia.
- 20
- 25

- Gradienttisignaali on suurempi sellaisilla keloilla, joita erottaa pitempi perusviiva, käyttökelpoisen perusviivan ollessa keloihin menevien kytkentöjen siedettävän induktanssin rajoittama. Tämä perusviivan rajoitus voidaan poistaa korvaamalla gradiometrin ilmaisimen magnetometriparilla, missä ulostulot vähennetään konfiguroidun gradiometrin muodostamiseksi. Tällainen laitekokoonpano vaatii suuren stabiiliuden ja lineaarisuuden sekä aika- että taajuusalueessa. Lisäksi, samoin kuin balansointivaikeudet, kukin ilmaisimen vaatii hyvin suuren dynaamisen alueen (paremman kuin
- 30

1:10⁹), jos sen on määrä olla käytettävissä liikkuvalla alustalla, kuten usein vaaditaan. Lisäksi on silti olemassa se ongelma, että magneettikenttä esiintyy rakenteessa.

- US-patenttijulkaisussa 5 122 744 on kuvattu viritetty kolmen ilmaisimen konfiguroitu gradiometri (Three SQUID Gradiometer, TSG), jossa käytetään keskeistä ilmaisinta takaisinkytkemään keloihin se maan magneettikentän komponentti, joka ympäröi kutakin kolmea ilmaisinta. Ulomman ilmaisiparin ulostulo vähennetään ja tämä erotus antaa tarvittavan gradientin mittausrvon, jos takaisinkytkentä on yhtenäinen. Tässä konfiguraatiossa dynaamista aluetta on huomattavasti parannettu, ja maan magneettikentän yksi komponentti ei osu suoraan ilmaisimiin.
- 10 Sama tekniikka on ulotettu SQUID-magnetometriin sijasta fluxgate-magnetometreihin perustuviin gradiometreihin [R.H. Koch ym.: "Room temperature three sensor magnetic field gradiometer", *Review of Scientific Instruments*, Jan. 1996, AIP, USA, vol. 67, No. 1, sivut 230-235].
- 15 Stabiiliuden, epälineaarisuuden, takaisinkytkennän yhtenäisyyden sekä kalibroinnin ja balanssin määräämisen tarpeen ongelmat eivät kuitenkaan ole voitettut. Vaikeus vähentää anturien ulostulot tarkasti aiheuttaa monet ongelmista.
- Esillä olevalle keksinnölle olennaista on myös käsittelytekniikka, jota käytetään liikekohinan kompensoimiseksi sukellusveneiden erittäin pientaajuisissa vastaanottoantenneissa [R.J. Dinger ja J.R. Davis, *Proc. IEEE*, vol. 64, No. 10, Oct. 1976].
- 20 Lisäteknikka SQUID-ilmaisimien suorituskyvyn parantamiseksi, joka tekniikka perustuu adaptiiviseen positiiviseen takaisinkytkentään, tunnetaan US-patentista 5 488 295. FI 702471
- 25 Tämän patenttiselityksen tarkoituksissa termin magnetometri pitää ymmärtää viittaavan laitteeseen, jolla mitataan magneettikentän komponentti jossakin nimenomaisessa suunnassa, ja termin gradiometrin pitää ymmärtää viittaavan laitteeseen, jolla mitataan magneettikentän gradienttikomponentteja. Kokonaiskenttämagnetometrin pitää ymmärtää viittaavan laitteeseen, jolla mitataan kokonaismagneettikenttä, ts. magneettikentän komponenttien kolmessa ortogonaalisessa suunnassa neliöiden summan neliöjuuri.
- 30 Esillä olevan keksinnön mukaan järjestelmä, jolla mitataan magneettikentän yksi tai useampi gradienttikomponentti, käsittää:

- (i) vähintään kaksi magneettista ilmaisinta, jotka ilmaisevat magneettikentän, jolloin kukin ilmaisin kehittää ilmaisnulostulon, joilla ilmaisnulostuloilla on niihin liittyvä kokonaisenergia E , ja jolloin vähintään kaksi ilmaisimista on sovitettu ilmaisemaan magneettikenttä olennaisesti samassa suunnassa, ja
- 5 (ii) välineet ilmaisnulostulojen adaptiivisen signaalinkäsittelyn suorittamiseksi siten, että järjestelmä on adaptiivisesti balansoitu, jolloin mainitut välineet kehittävät magneettikentän yhden tai useamman gradienttikomponentin,
- tunnettu siitä, että
- (iii) järjestelmä käsittää yleistakaisinkytkentävälineet olennaisesti tasaisen magneettikentän aikaansaamiseksi kahden magneettisen ilmaisimen kohdalla, ja
- 10 (iv) adaptiiviset signaalinkäsittelyvälineet käsittävät välineet ilmaisnulostulojen kokonaisenergian E minimoiseksi rajoituksen alaisena, jolloin rajoitus määrää, mikä yhdestä tai useammasta magneettikentän gradienttikomponentista tuotetaan.
- Keksintö saa aikaan sen edun, että se eliminoi tarpeen kalibroida ja määrätä balanssi
- 15 kontrolloiduissa olosuhteissa ja ylläpitää kalibrointia pitkät ajat. Lisäksi mekaaniselle jäykkyydelle ja stabiiliudelle asetetut vaatimukset, jotka edellytetään pienikohinaisessa toiminnassa, helpottuvat huomattavasti. Tunnettujen konfiguroitujen järjestelmien edut säilytetään.
- Edullisessa suoritusmuodossa välineet ilmaisnulostulojen kokonaisenergian E minimoimiseksi voivat tuottaa myös kokonaismagneettikentän mittausravon, minkä
- 20 mukaan rajoitus määrää, mitkä yhdestä tai useammasta magneettikentän gradienttikomponentista tai kokonaismagneettikentän mittausravosta tuotetaan.
- Eräässä toisessa edullisessa suoritusmuodossa gradiometri voi käsittää tietokoneen, johon on ladattu adaptiivinen signaalinkäsittelyalgoritmi (ASPA, adaptive signal
- 25 processing algorithm).
- Gradiometrin yleistakaisinkytkentävälineet voidaan sovittaa myös saamaan aikaan olennaisesti yhtenäinen magneettikentän gradientti kahden tai useamman magneettisen ilmaisimen kohdalla. Yleistakaisinkytkentävälineet voivat käsittää vähintään yhden yleistakaisinkytkentäkelaryhmän. Kukin ryhmä voi käsittää esimerkiksi kaksi
- 30 tai useampia kuin kaksi Helmholtzin kela.

Gradiometri voi käsittää myös:

välineet vähintään yhden erosignaalin kehittämiseksi kahden ilmaisulostulon välillä, jolloin mainitut ilmaisulostulot vastaavat kukin magneettikenttää olennaisesti samassa suunnassa, ja

- 5 analogi-digitaalimuunnosvälineet mainittujen yhden tai useamman erosignaalin ja kahden tai useamman ilmaisulostulon muuntamiseksi vastaavaksi digitaaliseksi dataksi.

- 10 Vähintään yksi magneettisista ilmaisimista voi olla yksi seuraavista: fluxgate-magnetometri, Hall-magnetometri, magnetoiresistiivinen anturi tai suprajohtava kvantti-interferenssimagnetometri (SQUID, superconducting quantum interference device). Vaihtoehtoisesti vähintään yksi magneettisista ilmaisimista voi olla gradiometri.

- 15 Jos gradiometriin sisältyy SQUID-magnetometri, gradiometri sisältää myös jäähdytysvälineet SQUID-magnetometrin lämpötilan alentamiseksi. Kussakin SQUID-magnetometrissä voi olla siihen liittyvät paikalliset takaisinkytkentävälineet magneettivuon olennaisesti vakion tilan ylläpitämiseksi asianomaisessa SQUID-magnetometrissä.

Keksinnön eräässä suoritusmuodossa gradiometri käsittää:

- 20 vähintään neljä magneettista ilmaisinta magneettikentän ilmaisemiseksi, jolloin kolme antureista on sovitettu siten, että ne ilmaisevat magneettikentän kolmessa olennaisesti ortogonaalisessa suunnassa, ja jolloin vähintään kaksi mainituista ilmaisimista on sovitettu siten, että ne ilmaisevat magneettikentän olennaisesti samassa suunnassa.

- 25 Lisäksi eräässä edullisessa suoritusmuodossa gradiometri voi käsittää vähintään kahdeksan magneettista ilmaisinta. Nämä kahdeksan tai useammat kuin kahdeksan magneettista ilmaisinta voivat olla sovitettut esimerkiksi tetraedrarakenteen kärkipisteisiin. Tässä laitekokoonpanossa kolme yleistakaisinkytkentäkelaryhmää voidaan orientoida kolmeen olennaisesti ortogonaaliseen suuntaan olennaisesti tasaisen magneettikentän kehittämiseksi kunkin kahdeksasta tai useammasta magneettisesta ilmaisimesta kohdalla.
- 30

Eräässä toisessa suoritusmuodossa gradiometri voi käsittää vähintään kolme magneettista ilmaisinta, jolloin vähintään kolme ilmaisimista on orientoitu olennaisesti

samaan suuntaan ja jolloin adaptiivisen signaalinkäsittelyn suorittavat välineet voivat kehittää magneettikentän vähintään toisen kertaluvun gradienttikomponentin.

- Keksinnön eräässä toisessa suoritusmuodossa järjestelmä voidaan sovittaa saamaan aikaan biomagneettinen ilmaisujärjestelmä. Mainittu vähintään yksi yleistakaisinkytkentäkelaryhmä voidaan sovittaa ympäröimään mitattavan magneettikentän kehittävästä subjektia, esimerkiksi ihmissubjektia, jolloin subjekti voi olla hyvin lähellä magneettisia ilmaisimia. Tämä järjestelmä saa aikaan tavanomaisiin biomagneettisiin ilmaisujärjestelmiin verrattuna sen edun, että tavanomaisissa järjestelmissä vaadittavaa suurta magneettisesti suojattua huonetta ei enää tarvita.
- 10 Keksinnön toisen näkökohdan mukaan menetelmä magneettikentän vähintään yhden gradienttikomponentin mittaamiseksi käsittää seuraavat vaiheet:
- (i) ilmaistaan magneettikentän komponentti kahdessa tai useammassa paikassa kahta tai useampaa magneettista ilmaisinta käyttäen, jolloin vähintään kaksi magneettikentän komponenttia ilmaistaan olennaisesti samassa suunnassa,
 - 15 (ii) kehitetään kaksi lähtösignaalia tai useampia lähtösignaaleja, joilla on niihin liittyvä kokonaisenergia E , joka vastaa mainittuja magneettikentän komponentteja,
 - (iii) järjestetään yleistakaisinkytkentä olennaisesti tasaisen magneettikentän muodossa mainittujen kahden tai useamman magneettisen ilmaisimen kohdalla,
 - (iv) suoritetaan lähtösignaalien adaptiivinen signaalinkäsittely ja minimoidaan lähtösignaalien kokonaisenergia E , rajoituksen alaisena siten, että gradiometri on adaptiivisesti balansoitu,
 - 20 (v) rajoitetaan kokonaisenergian E , minimointi siten, että tuotetaan magneettikentän gradienttikomponentti, ja
 - (vi) tuotetaan vähintään yksi magneettikentän gradienttikomponentin mittauservo.
- 25 Keksinnön tämän näkökohdan eräässä suoritusmuodossa menetelmä voi käsittää seuraavat vaiheet:
- (i) minimoidaan lähtösignaalien kokonaisenergia E , rajoituksen alaisena siten, että gradiometri on adaptiivisesti balansoitu, ja
 - (ii) rajoitetaan kokonaisenergian E , minimointi siten, että tuotetaan kokonaismagneettikentän mittauservo.
 - 30

Keksinnön tämän näkökohdan vaihtoehtoisessa suoritusmuodossa menetelmä voi käsittää vaiheen, jossa järjestetään olennaisesti yhtenäinen magneettikentän gradientti mainittujen kahden tai useamman magneettisen ilmaisimen kohdalla. Menetelmää voidaan käyttää magneettikentän komponenttien mittaamiseksi ihmissubjektissa hyvin lähellä mainittuja kahta tai useampaa magneettista ilmaisinta.

Keksinnön tämän näkökohdan eräässä toisessa suoritusmuodossa menetelmä voi käsittää seuraavat vaiheet:

- (i) ilmaistaan magneettikentän komponentti kolmessa tai useammassa paikassa, jolloin vähintään kolme mainituista magneettikentän komponenteista ilmaistaan olennaisesti samassa suunnassa,
 - (ii) minimoidaan lähtösignaalien kokonaisenergia E , rajoituksen alaisena siten, että gradiometri on adaptiivisesti balansoitu, ja
 - (iii) rajoitetaan kokonaisenergian E minimointi siten, että tuotetaan magneettikentän vähintään toisen kertaluvun gradienttikomponentti.
- Järjestelmä käyttää hyväksi adaptiivista signaalinkäsittelytekniikkaa suurten balansitasojen saavuttamiseksi. Tämän tekniikan soveltaminen magneettiseen ilmaisuun gradiometrijärjestelmien avulla ei ole tunnettu. Adaptiivisen signaalinkäsittelyn käyttäminen on olennaista järjestelmän sallimiseksi käyttää magneettikentän yleisen (tai kattavan) takaisinkytkennän menetelmää. Liikkuvalta alustalta käytettävälle järjestelmälle tämä järjestää riittävän dynaamisen alueen, jotta järjestelmä toimii maan magneettikentässä säilyttäen samalla suuret balanssitasot. Lisäksi se saa aikaan myös sen edun, että se estää ympäristön ulkoisen magneettikentän tulemisen suoraan ilmaisimiin. Lisäksi se helpottaa järjestelmän mekaanisen jäykkyyden reunaehtoja.

Keksintö selitetään nyt vain esimerkin avulla viitaten seuraaviin kuvioihin, joissa:

kuvio 1 esittää tavanomaisesti konfiguroidun, kahteen SQUID-magnetometriin perustuvan gradiometrilaitteen piirikaaviota magneettikentän gradienttien mittaamiseksi,

kuvio 2 esittää kolmen tunnetussa tekniikassa tunnetun SQUID-gradiometrilaitteen piirikaaviota,

kuvio 3 esittää SQUID-magnetometrilaitteen kaaviota,

kuvio 4 esittää vuokaaviota adaptiivisen signaalinkäsittelyalgoritmin (ASPA) kuvaamiseksi, joka algoritmi voi sisältyä tähän keksintöön,

kuvio 5 esittää esillä olevan keksinnön yksiakselisen yleistakaisinkytkentäsovitelman piirikaaviota,

- 5 kuvio 6 esittää esillä olevan keksinnön neljän ilmaisimen suoritusmuodon kaaviota ja kuvaa välineitä hyvän balanssin saamiseksi yhden gradientin mittaamista varten,

kuvio 7 esittää tuloksia, joita saadaan toimivasta järjestelmästä, joka on sovitettu kuten kuviossa 6,

- 10 kuvio 8 esittää yleistakaisinkytkentägradiometrin kaaviota magneettikentän viiden itsenäisen gradienttimittausarvon saamiseksi, ja

kuvio 9 esittää tämän keksinnön biomagneettisen ilmaisujärjestelmän sovitelmaa.

- 15 Kuviossa 1 tavanomaisesti konfiguroitu gradiometri magneettikentän gradientin mittaamiseksi voi käsittää kaksi magnetometriä 1a, 1b, tyypillisesti SQUID-magnetometriä, joita etäisyys d (perusviivaetäisyys) erottaa, minkä avulla kumpikin magnetometri 1a, 1b mittaa magneettikentän erityisessä paikassaan. Gradiometri käsittää myös vahvistimet 2a, 2b ja integraattorit 3a, 3b, takaisinkytkentäkelat 4a, 4b ja vastukset 5a, 5b, joilla on sama resistanssi, korjausvirran järjestämiseksi, joka tuottaa magneettikentän, joka yhtä suuri ja päinvastainen kuin SQUIDeihin tuleva ulkoinen magneettikenttä. Jännitteet V_a , V_b tuotetaan laitteesta magneettikenttää asianomaisen SQUID-magnetometrin 1a, 1b kohdalla vastaavina. Näiden kahden jännitteen erotus $V_a - V_b$ muodostaa magneettikentän gradientin likiarvon.

- 25 Kuviossa 1 esitetyllä kahden magnetometrin gradiometrillä on kahden SQUIDin suuri yhteissignaali, joka johtuu maan magneettikentästä ja vaatii sen vahvistimen lähes mahdottoman suuren yhteismuodon vaimennuksen, joka muodostaa kahden SQUID-magnetometrin 1a, 1b ulostulojen erotuksen. Lisäksi kumpikin magnetometri ja siihen liittyvä vahvistin tarvitsee hyvin suuren dynaamisen alueen (paremman kuin $1:10^9$) ja poikkeuksellisen hyvän lineaarisuuden, jos sitä on määrä menestyksellisesti käyttää liikkuvalla alustalla.

- 30 Kuviossa 2 tavanomainen kolmesta magnetometristä konfiguroitu gradiometri (TSG) (US-patentti 5 122 744) käsittää kolme SQUID-magnetometriä 6, 7, 8 ja viisi takaisinkytkentäkelaa 9, 10, 11, 12, 13. SQUIDit 6, 7 ovat ilmaisim-SQUIDeja, joita käytetään magneettikentän mittaamiseen niitä vastaavissa paikoissa ja joita etäisyys

1 erottaa. SQUID 8 toimii vertailumagnetometrinä, ja sitä käytetään kumoamaan maan magneettikentästä johtuvan taustamagneettikentän vaikutus SQUIDEissa 6, 7 takaisinkytkentäkelojen 9, 10 avulla, joille järjestetään signaali vertailu-SQUIDista 8. Kuviossa on esitetty myös vahvistimet 14, 15, 16 ja integraattorit 17, 18, 19.

- 5 Vertailu-SQUID-magnetometriä 8 käytetään samalla tavalla kuin ilmaisins-SQUID-magnetometrejä 6, 7 paitsi, että takaisinkytkentäsignaali SQUIDille 8 syötetään kaikille kolmelle SQUIDille 6, 7, 8 takaisinkytkentäkelojen 9, 10, 11 kautta. Vahvistinta 6 ja integraattoria 19 käytetään takaisinkytkentäsignaalien kehittämiseksi keloille 9, 10, 11, jotka vähentävät taustamagneettikentän vastaavilta SQUIDEilta 6, 7, 8.
- 10 Kenttägradientti mitataan vähentämällä kahdesta ilmaisimesta 6, 7 saatavat ulostulot. Eräs kolmen SQUIDin järjestelmän etu on se, että nämä ulostulot ovat paljon pienemmät kuin kahden SQUIDin gradiometriä (kuvio 1) käyttäen mitatut ulostulot. Tässä konfiguroidussa järjestelmässä ei kuitenkaan ole voitettu stabiiliuden, epälineaarisuuden ja takaisinkytkennän yhtenäisyyden ongelmia eikä tarvetta kalibroida ja määrätä balanssi.

- 15 Keksinnön taustan selvittämiseksi SQUID-magnetometrin toiminta selitetään kuvion 3 yhteydessä. SQUID 20 käsittää suprajohtavan silmukan 21, jossa on vähintään yksi heikko liitos 22 (esim. Josephson-liitos), joka pystyy ilmaisemaan jaksollisen virta-jännitesuhteen. SQUID on magneettisesti kytketty suprajohtavaan vuomuuntajaan tulokelan 23 kautta. Vuomuuntajan sieppauskela 24 ilmaisee mitattavan magneettikentän. Mikäli ilmaistavassa magneettikentässä esiintyy muutos, tulokelaan 23 indusoituu pyörrevirta. Pyörrevirta tuottaa magneettikentän, joka kytkeytyy SQUID-silmukkaan 21 ja ilmaistaan. SQUIDissa (kuten kuviossa 1, 2, 3 ja 4 esitetään) olisi tavallisesti siihen liittyvä vuomuuntaja.

- 25 Esillä olevan keksinnön gradiometri voidaan konfiguroida mittaamaan magneettikentän gradientteja ja magneettikenttiä, jotka ovat peräisin etäisistä lähteistä, maan suuren ja olennaisesti epätasaisen magneettikentän mukana ollessa, erityisesti jos gradiometriä käytetään liikkuvalla alustalta. Vaihtoehtoisesti gradiometri voidaan konfiguroida mittaamaan magneettikentän gradientteja tai magneettikenttiä, jotka
- 30 ovat peräisin lähteistä, jotka ovat hyvin lähellä ilmaisinta, jolloin ilmaisins ei ole liikkuva, vaan sitä käytetään magneettisesti kohinallisessa ympäristössä.

Kuvio 5 esittää keksinnön erästä suoritusmuotoa: yksiakselista yleistakaisinkytkentägradiometriä. Järjestelmä käsittää kaksi magnetometriä 25a, 25b, ja sitä voidaan käyttää joko magneettikentän gradienttien mittaamiseen tai joissakin laitekokoon-

panoissa kokonaismagneettikentän mittaamiseen. Magnetometrit 25a, 25b on esitetty SQUID-magnetometreinä, vaikka voidaan käyttää myös muita magnetometrilaitteita, esimerkiksi fluxgate-laitteita, Hall-anturi-ilmaisimia tai magnetoiresisttiivisiä laitteita.

- 5 Kaksi magnetometriä 25a, 25b sijaitsevat päällekkäin (akselialinen kokoonpano) tai vierekkäin (ei-akselialinen kokoonpano), ja ne ilmaisevat magneettikentän jossakin erityisessä suunnassa. Kummallakin SQUIDilla 25a, 25b on SQUID-magnetometrien tapauksessa sen oma takaisinkytkentäkela 26a, 26b, joka ympäröi siihen liittyvää magnetometriä 25a, 25b. Nämä paikalliset takaisinkytkentäkelat 26a, 26b saavat
10 aikaan vuolukituksen vastaaville SQUID-magnetometreille 25a, 25b, kuten tunnetusta tekniikasta tiedetään (katso kuviot 1 ja 2).

- Kummassakin kanavassa on siihen liittyvä vahvistin 27a, 27b ja integraattori 28a, 28b, ja siksi kummallakin magnetometrillä 25a, 25b on lukuelektroniikka, joka toimii vuolukitus-
15 silmukkamoodissa käyttäen sisäistä takaisinkytkentää 28a:n, 28b:n kautta siten, että elektroniikan takaisinkytkentävuoto ylläpitää magneettivuon vakiotilaa, joko äärellistä tai nollaa, kummassakin magnetometrissä 25a, 25b.

- Koska magneettivuoto magnetometreissä 25a, 25b on vakio, takaisinkytkentävirta on verrannollinen kumpaankin magnetometriin 25a, 25b kohdistettuun ulkoiseen magneettikenttään, ja siksi ulostulot 29a, 29b magnetometrien lukuelektroniikasta antavat takaisinkytkentävirran mittausravon vastaavaan magnetometrianavaan. Magnetometrianavien ulostulot 29a, 29b vastaavista integraattoreista 28a, 28b syötetään
20 sitten adaptiivisiin signaalinkäsittelyvälineisiin (selitetään jäljempänä).

- Järjestelmä käsittää myös (yhteismuotoiset) yleistakaisinkytkentäkelat 30a, 30b, jotka sulkevat magnetometrit 25a, 25b sisäänsä. Tämän patenttiselityksen tarkoituksessa termin yleistakaisinkytkentä tulisi ymmärtää merkitsevän yhden tai useamman
25 etäällä olevan kelaryhmän käyttämistä magneettisen takaisinkytkennän syöttämiseksi kaikille magneettisille ilmaisimille samanaikaisesti. Lähtösignaalit 29a, 29b magnetometrianavista siirretään komponenttiin 31, joka laskee elektronisesti yhteen kahdesta magnetometrillä 25a, 25b saatavista magneettikenttäulostuloista, ja sen jälkeen
30 yleistakaisinkytkentäintegraattoriin 32. Ulostulo 33 yleistakaisinkytkentäintegraattorista 32 siirretään yleistakaisinkytkentäkelojen 30a, 30b kautta, ja ne voidaan siirtää signaalinkäsittelyvälineisiin.

Takaisinkytkentäkenttä emuloi realistisesti todellista ulkoista magneettikenttää, ja se syötetään likimain samanlaisena kumpaankin magnetometriin 25a, 25b. Magneto-

metrien 25a, 25b sulkeminen yleiskelojen 25a, 25b sisälle sallii siksi maan magneettikentän vaimentamisen magnetometriä 25a, 25b kohdalla. Ulostulo yleistakaisinkytkentäintegraattorista 32 antaa takaisinkytkentäkeloissa 30a, 30b kulkevan virran mittausravon. Lähtödata, joka syötetään tietojenkäsittelyvälineisiin, käsittää siksi yksittäisten magnetometriä ulostulot 29a, 29b ja yleistakaisinkytkentäkeloissa 30a, 30b kulkevan virran (ulostulo 33).

Yleistakaisinkytkennän käyttäminen helpottaa erillisten magnetometrikanaavien sovitussuatuimuksia ja eliminoi magneettikentän indusoimaan kohinaan liittyvät ongelmat, ja myös hystereesi- ja kenttämodulointiongelmat pienenevät. Se myös helpottaa magnetometriä 25a, 25b vaadittavan orientaatiokohdistuksen tarkkuutta. Kumpaankin SQUID-magnetometriin 25a, 25b liittyvien paikallistakaisinkytkentäkelojen 26a, 26b käyttäminen sallii magneettikentän gradienttimittauksen vaatiman pienen kohinan ja tarkan erotuskyvyn. Lisäksi se saa aikaan riittävän dynaamisen alueen ulommassa yleissilmukassa 30a, 30b maan magneettikentän käsittelemiseksi.

Käytettäessä magnetometrejä 25a, 25b liikkuvalla alustalla etäällä olevien magneettisten lähteiden mittaamiseksi niiden täytyy selviytyä kääntämisestä maan magneettikentässä ($\sim 70 \mu\text{T}$), joka edustaa $\sim 140 \mu\text{T}$ muutosta. Tyypillisesti SQUID-magnetometrit ovat herkkiä 10 fT asti, ja siksi tämä on dynaaminen alue $1:1,4 \times 10^{10}$ eli 203 dB, joka ei ole saavutettavissa puolijohteisiin perustuvaa lukuelektroniikkaa käyttäen. Tasaisen magneettikentän kumoamisella ja mittaamalla magneettikentän gradientteja dynaamisen alueen ongelmat voidaan kuitenkin voittaa.

Käytettäessä kiinteältä alustalla lähellä olevien magneettisten lähteiden mittaamiseksi tasaisen magneettikentän kumoaminen on myös edullista. Tällaisissa mittauksissa etäällä olevat magneettiset gradienttilähteet voivat myös häiritä mittauksia. Tämä voidaan voittaa mittaamalla ja eliminoimalla ulkoiset gradientit yleistakaisinkytkentää käyttäen.

Seuraava kuvaus liittyy gradiometriin, kun se on konfiguroitu mittaamaan etäällä olevia lähteitä liikkuvalla alustalla. Tarkastellaan kahta magnetometriä 25a, 25b, jotka ilmaisevat magneettikentät B_A ja B_B . Magneettikentän gradientti on $(B_A - B_B)$, ja keskimääräinen magneettikenttä puolitiessä niiden välillä on $(B_A + B_B)/2$, joka on verrannollinen magneettikenttien summaan. Magneettikentät B_A , B_B lasketaan yhteen (31) ja tämä summa takaisinkytketään integraalitakaisinkytkennän kautta yleiskeloihin 30a, 30b (integraattori 32 asettaa automaattisesti tekijän 1/2). Magneettikenttä puolitiessä magnetometriä 25a, 25b välillä pidetään siksi tarvittaessa aina vakiona (eli nollana jos se aluksi on nolla).

Kahdella magnetometrillä 25a, 25b on nyt poistettu maan magneettikentän, B_E , tasainen komponentti, jolloin saadaan $(B_A - B_E)$ ja $(B_B - B_E)$. Jos magneettikentän gradienttia, $(B_A - B_B)$, tarvitaan, niin tavanomaisissa gradiometrijärjestelmissä tämä johdetaan vähentämällä magnetometrien ulostulot. On kuitenkin lähes varmaa, että magnetometreillä on niiden ulostulojen hieman eriävä skaalaus (epäsovitus) ja ne ovat hieman väärin kohdistetut ja suunnatut, koska tavanomainen elektroniikka saattaa olla lineaarinen vain suhteessa $1:10^4$ ja voidaan sovittaa samanlaisella tarkkuudella. Esimerkiksi magnetometrien vain 0,1 asteen suuruinen väärä suuntaus johtaa $1,5 \times 10^{-6}$ suuruiseen virheeseen. Luokkaa 100 fTm^{-1} olevien magneettikenttien mittaamiseksi maan magneettikentän taustassa ($\sim 70 \mu\text{T}$), vaaditaan luokkaa $1:10^{10}$ oleva tarkkuus, ja tämä on selvästikin vaikea saavuttaa tällaisilla väärän suuntauksen vaikutuksilla.

Sen sijaan, että yrittäisi vähentää anturien ulostulot, kuten tunnetussa tekniikassa, esillä oleva järjestelmä käyttää energian minimointialgoritmia, joka on sopivan rajoituksen alainen, minkä tarkoituksena on ottaa talteen gradientti-informaatio. Energian minimointialgoritmia voidaan käyttää myös kokonaiskentän mittaussarvon saamiseksi kolmesta ortogonaalisesta magnetometristä samalla tavalla.

Tämä menetelmä gradientti-informaation saamiseksi on adaptiivinen siinä mielessä, että se yrittää jatkuvasti parantaa balanssia anturien ulostulojen historian perusteella valitulla aika-asteikolla. Tämän energian minimointialgoritmin käyttäminen sallii yleistakaisinkytkennän (yhteismuodon) käytön monien ongelmien voittamiseksi olemassa olevissa järjestelmissä, kuten esimerkiksi stabiilius- ja takaisinkytkennän yhtenäisyysongelmat ja tarve kalibroida ja määrätä balanssi.

Adaptiivista signaalinkäsittelyalgoritmia (ASP, adaptive signal processing algorithm) käytetään magneettikentän gradientin mittaussarvon saamiseksi magnetometriin ulostuloista ja on keksinnön olennainen näkökohta vaadittavan suuren balanssitason saavuttamiseksi. Lisäksi ASPA on edullinen sikäli, että se tarjoaa balansointitekniikan, joka voidaan suorittaa jatkuvasti tosijassa. ASPA:n periaate perustuu tunnettuun matemaattiseen tekniikkaan, jota käytetään laajalti toisentyyppisissä järjestelmissä, esimerkiksi vaiheistetuissa ryhmäantenneissa adaptiivisessa keilanmuodostuksessa. Tämän tekniikan lähemmät yksityiskohdat löytyvät julkaisusta *Radar Array Processing*, tekijät S. Haykin, J. Litva ja T.J. Shepherd (julk. Springer-Verlag (1993)).

Gradientin mittauksen tapauksessa ASPA toimii muodostamalla (esimerkiksi) kahden z -suunnassa kohdistetun ja erotetun magnetometrin ulostulot, B_{Z1} ja B_{Z2} , lineaar-

riseksi yhdistelmäksi $\omega_1 B_{Z1} + \omega_2 B_{Z2}$. Tämän yhdistelmän energia, määritellyn ikkunan yli, minimoidaan asettamalla kertoimet ω_1 ja ω_2 yhden tai useamman rajoituksen alaisena. Rajoituksen tarkoitus on välttää triviaaliratkaisu $\omega_1 = \omega_2 = 0$ ja tuottaa haluttu gradientti-informaatio. Tätä proseduuria kutsutaan gradiometrijärjestelmän adaptiiviseksi balansoinniksi.

Rajoituksen muoto on $S^T \omega = \mu$, jossa S ja μ valitaan rajoitusmatriiseiksi (T = transpositio). Esimerkiksi jos kaksi magnetometriä 25a, 25b olisivat täydellisesti sovitut ja kohdistetut, niin sovelletaan seuraavaa rajoitusta:

10

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{pmatrix} = 1$$

15 (jossa $S^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}$ ja $\mu = 1$) ts. $\omega_1 = 1$, algoritmi laskisi $\omega_2 = -1$. Ulostulo, joka on lineaarinen yhdistelmä $\omega_1 B_{Z1} + \omega_2 B_{Z2}$, olisi silloin $B_{Z1} - B_{Z2}$, ts. vaadittu gradientti. Jos ilmaisimet olisivat epäsovitetut, niin ω_2 olisi automaattisesti -1:stä eriävä tämän epäsovituksen vuoksi korjaten sen siten ilman kalibroinnin tarvetta.

20 Kuviossa 4 esitetään vuokaavio ASPA:n toiminnan kuvaamiseksi. Ajanhetkellä t ulostulon, $y(t)$, antaa yhtälö

$$y(t) = \underline{x}^T(t) \underline{\omega}$$

25 jossa $\underline{x}(t)$ on syötetty datajoukko ajanhetkellä t (ts. magnetometrien ulostulot) ja $\underline{\omega}$ saadaan yhtälöstä $M(t)^{-1} S (S^T M(t)^{-1} S)^{-1} \mu$. $M(t)$ on kovarianssimatriisi ajahetkellä t ja sen antaa yhtälö

$$M(t) = \beta^2 M(t-1) + (1-\beta^2) \underline{x}(t)^2$$

30 Kullakin uudella syötetyllä datajoukolla, $\underline{x}(t)$, algoritmi laskee kovarianssimatriisin, $M(t)$, joka riippuu edeltävästä kovarianssimatriisista, $M(t-1)$, ajanhetkellä $t-1$.

Kuviossa 5 esitetty järjestelmä sisältää kaksi magneettikentän ilmaisevaa magnetometriä 25a, 25b ja kuvaa yleistakaisinkytketyn gradiometrijärjestelmän toimintaperiaatetta, jota voidaan käyttää informaation antamiseksi sekä kenttägradientista yhdes-

sä suunnassa että kokonaismagneettikentästä, esim. B_x ja dB_x/dx . Jos nämä kaksi magnetometriä 25a, 25b ovat täydellisesti kohdistetut, niin kaksi magnetometriä ovat riittävät antamaan kenttägradientin tarkan mittausravon. Jos magnetometrien kohdistus kuitenkin on vähänkin väärä (mitä välttämättä tapahtuu), niin magnetometrit 25a, 25b voivat olla herkkiä magneettikentille myös ortogonaalisissa y- ja z-suunnissa.

Käytännössä hyödyllisempi järjestelmä sisältää siksi magnetometrit niiden kahden suunnan tarkkailemiseksi, jotka ovat ortogonaaliset gradientin ilmaiseviin magnetometreihin 25a, 25b nähden. Nämä magneettikentät selvitetään ASPAssa magneettikentän gradientin dB_x/dx tarkemman mittauksen tuottamiseksi. (Lisäksi B_y :n ja B_z :n mittauksia voidaan käyttää yhdessä B_x :n mittauksen kanssa kokonaismagneettikentän saamiseksi erillistä ASPAta käyttäen.)

Tämä on esitetty kuviossa 6, joka esittää magneettikentän komponentteja B_{z1} , B_{z2} , B_{x1} , B_{y1} , jotka mitataan neljällä ilmaisimella (ei esitetty kaaviossa). Nämä neljä mitattua komponenttia, B_{z1} , B_{z2} , B_{x1} , B_{y1} , syötetään ASPAlle 34 (analogi-digitaalimuuntimen (ADC, Analogue to Digital Converter) 35 kautta). ASPAn 34 sisäänmenoille sijoitetaan vastaavasti painot ω_1 , ω_2 , ω_3 , ω_4 . Eräs rajoitus voisi olla

$$(1 \ 0 \ 0 \ 0) \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{pmatrix} = 1$$

joka määrää kertoimen ω_1 1:ksi ja sallii muiden tulla energian minimoinnin vapaasti aseteltaviksi. Tuloksena olisi, että ω_2 asettuisi lähes -1:ksi, kuten edellä selitettiin, ja ω_3 ja ω_4 tulisivat vaadittaviksi pieniksi luvuiksi, jotka korjaavat väärän kohdistuksen. ASPAn 34 ulostulo on silloin

$$(B_{z1} \ B_{z2} \ B_{x1} \ B_{y1}) \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{pmatrix} = \frac{\partial B_z}{\partial z}$$

ts. tarvittava gradientti.

Vaihtoehtoinen menetelmä, joka voi olla edullinen, olisi suorittaa B_{Z1} :n ja B_{Z2} :n vähennyslasku ja käyttää tätä yhtensä sisäänmenona ASPAlle 34. Syötettävä matriisi olisi silloin (B_{Z1} - B_{Z2} , B_{X1} , B_{Y1} , B_{Z1}) ja käytettäisiin samaa rajoitusta.

- 5 Energian minimointi tapahtuu ohjelmistossa määrätyn aikakehyksen yli, joka on mitattavaan signaaliin verrattuna pitkä. Järjestelmästä tulee siksi itsebalansoiva, se sää-
tää itsensä tämän aikavälin yli. Balanssin muutokset, jotka ovat verrattavissa tähän
ajanjaksoon tai ovat tätä hitaampia, sovitetaan pois helpottaen siksi stabiiliusrajoi-
tuksia, jotka soveltuvat yksinkertaisiin vähennysmenetelmiin. Magneettikentän gra-
10 dientit, jotka muuttuvat nopeammin kuin adaptointiaika, ovat ilmeisiä mitattavina
gradienttisygnaleina. Algoritmissa on tehokas päivitysproseduuri siten, että kukin
uusi pistejoukko sallii ikkunan liukumisen aikasarjoja pitkin.

- Kuviossa 6 esitetty järjestelmä vaatii neljä magnetometriä yhden gradientin mittaa-
miseksi tarkasti, vaikka kutakin lisägradienttimittausta varten tarvitaan vain yksi
magnetometri lisää. Esimerkiksi vielä yhden magnetometrin lisääminen sallii mitta-
15 uksen dB_Y/dy , ja tämän gradientin epäideaalisuudet korjataan B_X :n ja B_Z :n mittauk-
silla.

- Järjestelmän potentiaalisesti hyödyllisin konfiguraatio on 5-akselinen gradienttigradiometrijärjestelmä. Tätä järjestelmää voidaan käyttää mittaamaan se minimimäärä
20 gradientteja, joka tarvitaan dipolaarisesta lähteestä johtuvan magneettikentän kaik-
kien itsenäisten gradienttien mallintamiseksi. Minimivaatimuksena 5-akselinen gra-
diometrijärjestelmä gradienttien dB_X/dx , dB_Y/dy , dB_X/dy , dB_X/dz ja dB_Y/dz mittaami-
seksi käsittää kaikkiaan kahdeksan magnetometriä. Käytännössä voi kuitenkin olla
edullista sallia jonkin verran redundanssia ja konfiguroida 5-akselinen gradienttijär-
jestelmä, jossa on useampia kuin vähintään vaaditut kahdeksan magnetometriä.

- 25 Moniakselinen gradiometrijärjestelmä toimii samalla periaatteella kuin edellä kuvat-
tu yksiakselinen gradiometri. Tyypillisesti yleistakaisinkytkentää voidaan käyttää
sellaisen kelaryhmän avulla, joka käsittää päätakaisinkytkentäkelat, kuten esimer-
kiksi Helmholtzin kelat tai korkeampaa kertalukua olevat, yhden kutakin suuntaa x ,
 y , z kohti. Kelaryhmä voi käsittää myös lisätyt pienemmät virityskelat sovituksen pa-
30 rantamiseksi magneettisilla ilmaisimilla ja mahdollisen epäyhtenäisyyden voittami-
seksi yleiskeloissa. Kelojen ulostuloja voidaan käyttää ortogonaalisina kenttäesti-
maattoreina ASPAn suorittamassa kokonaiskentän evaluoinnissa. Samanlaista pro-
seduuria käytetään magneettikentän gradientin mittaussarvojen määrittämiseksi. Eril-
linen mutta samanaikainen energian minimointi suoritetaan kullekin gradienttikom-
35 ponentille. Syöttötiedot ovat joko kustakin magnetometristä tulevia aikasarjoja tai

magnetometrien ulostulojen lineaarisia yhdistelmiä. Rajoitukset valitaan gradiometrin eri komponenttien valinnan pakottamiseksi.

Kuvio 7 esittää kuviossa 6 kaaviollisesti kuvatun toiminnallisen järjestelmän tapauksessa saatuja tuloksia, joka järjestelmä käsittää kaksi SQUIDia Z-suunnassa (Z_1 ja Z_2 vastaavasti) ja yhden kummassakin ortogonaalisessa suunnassa (X ja Y). Neljä ylintä piirtoa esittävät ulostuloja B_{Z1} , B_{Z2} , B_{X1} , B_{Y1} (kuten kuviossa 6) ja alin piirto esittää gradienttimittausta $B_{Z1}-B_{Z2}$. Ulostulot kehittää pienen magneettisen dipolin liike. Z_1 - ja Z_2 -signaalien vastakkainen luonne on osoitus siitä, että yleistakaisinkytkentämenetelmä toimii oikein, ts. magneettikenttä puolitiessä Z_1 :n ja Z_2 :n välillä nollautuu.

Kuvio 8 esittää piirikaaviota sen kuvaamiseksi, miten gradiometrijärjestelmä voidaan konfiguroida saamaan aikaan kokonaiskenttäulostulon mittausarvo, B_T , ja viisi gradienttiulostuloa, G_{zz} (dB_z/dz), G_{xx} (dB_x/dx), G_{xz} (dB_x/dz), G_{yx} (dB_y/dx) ja G_{yz} (dB_y/dz). Tässä esimerkissä gradiometri käsittää yhdeksän magnetometriä (selvyyden vuoksi ei esitetty), joista saatavat ulostulot saavat aikaan magneettikentän komponenttien mittaukset, B_{x1} , B_{x2} , B_{x3} , B_{y1} , B_{y2} , B_{y3} , B_{z1} , B_{z2} , B_{z3} (magneettikentän komponenttien suunnat on esitetty kuviossa). Magneettikentän mittausarvot kussakin suunnassa, x, y ja z, lasketaan yhteen elektronisesti ja siirretään liittyvään integrointiin 36a, 36b, 36c, josta saatavat ulostulot siirtyvät transduktanssivahvistimien 37a, 37b, 37c kautta ja saavat aikaan virran vastaavasti kolmeen yleistakaisinkytkentäkelaan 30a, 30b ja 30c.

Magneettikentän summat kussakin suunnassa x, y, z (ts. ulostulot integraattoreista 36a, 36b, 36c) antavat kokonaismagneettikentän mittausarvon x-, y- ja z-suunnissa, B_x , B_y ja B_z vastaavasti. Yleistakaisinkytkentäkelat 30a, 30b, 30c on orientoitu olennaisesti ortogonaalisiin x-, y- ja z-suuntiin ja, kuten edellä yksiakselisen gradiometrijärjestelmän tapauksessa selitettiin, niillä on se vaikutus, että ne kumoavat ympäristön magneettikentän.

Viiden gradienttimittauksen, G_{zz} , G_{xx} , G_{xz} , G_{yx} ja G_{yz} , johtamiseksi magneettikentän gradienttimittaukset, $B_{z1}-B_{z2}$, $B_{x2}-B_{x3}$, $B_{x1}-B_{x2}$, $B_{y2}-B_{y3}$ ja $B_{y2}-B_{y1}$ johdetaan elektronisesti (ei esitetty kuviossa) magnetometrien ulostuloista, ja nämä gradienttien estimaattorit siirretään ADChen 21. Vastaavat digitaaliset ulostulot 42, 43, 44, 45, 46 ADCstä 35 siirretään tietokoneeseen ladatulle ASPalle 34b yhdessä digitaalisten ulostulojen 39, 40, 41 kanssa adaptiivista signaalinkäsittelyä varten magneettikentän tarkan gradientti-informaation kehittämiseksi.

Kokonaismagneettikentän mittausarvon, B_T , saamiseksi integroidut ulostulot B_x , B_y ja B_z siirretään ADChen 35, joista saatavat vastaavat digitaaliset ulostulot 39, 40, 41 siirretään adaptiiviselle signaalinkäsittelyalgoritmille (ASPA) 34a.

Selvyyden vuoksi kuviossa 8 on esitetty kaksi adaptiivista signaalinkäsittelyalgoritmia 34a, 34b. Käytännössä kutakin itsenäistä gradienttimittausta kohti tarvitaan kuitenkin erillinen energian minimointialgoritmi (ASPA). Esimerkiksi G_{xx} :n määrittämiseksi magneettikentän komponenttien summia kussakin suunnassa x , y ja z (digitaalisignaaleja 39, 40, 41) ja erosignaalia B_{z1} - B_{z2} (digitaalisignaalia 42) käytetään energian minimoimiseksi. Erillinen energian minimointirutiini tarvitaan myös kokonaismagneettikentän mittausta varten. Käytännössä on kuitenkin kätevää ladata kaikki tarvittavat algoritmit yhteen tietokoneeseen.

Kuviossa 8 esitetty esimerkki edustaa vain yhtä tapaa yhdistää ulostulot yhdeksästä magnetometrillä magneettikentän viiden gradientin mittausarvon saamiseksi. Magnetometri- ulostulujen muita lineaarisia yhdistelmiä voidaan myös käyttää sisääntuloina adaptiiviselle signaalinkäsittelyalgoritmille tällaisen informaation saamiseksi.

Täydelliselle rakenteelle asetetut jäykkyydsvaatimukset merkitsevät sitä, että sen tulisi mieluummin olla mahdollisimman kevyt ja jäykkä. Eräs sopiva rakenne voi olla ohutseinäisistä hiilikuituputkista tehty tetraedri, jossa magnetometri-ryhmät on asetettu kuhunkin kärkipisteeseen. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää ristin muotoista rakennetta.

Gradiometrijärjestelmässä, joka on suunniteltu olemaan liikuteltava, esim. liikkuvala alustalla, perusviiva voi tyypillisesti olla 40 mm ja 100 mm välillä, koska pienemmät rakenteet antavat paremman jäykkyyden kuin suuremmat. Jos gradiometri tulee kuitenkin pysymään paikallaan, voidaan käyttää pitempää perusviivaa paremman herkkyyden antamiseksi vähemmän jäykälle gradiometrille. Sama herkkyys voidaan toteuttaa käyttäen herkempiä magnetometriä lyhyemmällä perusviivalla jäykkyyden suurentamiseksi, esimerkiksi SQUID-magnetometrejä, jotka on valmistettu 25 mm siruille 40 mm välein, pikemminkin kuin 10 mm siruille 100 mm perusviivalla.

Yleistakaisinkytkentäkelojen täytyy mieluummin olla riittävän suuret olennaisesti tasaisen magneettikentän kehittämiseksi magnetometri-ryhmien kohdalle, ja yleistakaisinkytkentäkelojen koon määrää jossakin määrin se nimenomainen sovellus johon järjestelmää käytetään. Esimerkiksi jos suuri tila on käytettävissä, ehkä staattiselle ra-

kenteelle, jossa perusviiva on pitempi, yleistakaisinkytkentäkelat voivat olla suuria, halkaisijaltaan tyypillisesti 1 m, mikä synnyttää tasaisen magneettikentän kaikkien magnetometrien kohdalle. Kääntäen jos perusviiva on lyhyt ja käytettävissä oleva tila rajoitettu, yleistakaisinkytkentäkelat voivat olla paljon pienemmät, esimerkiksi

5 10-20 cm. Erityisesti pienemmän halkaisijan omaavien yleiskelojen tapauksessa voidaan käyttää pienempiä virityskeloja kenttäsovituksen parantamiseksi magnetometreissä ja mahdollisen epäyhtenäisyyden voittamiseksi yleiskeloissa.

Yleistakaisinkytkennän käyttämisen tärkeys järjestelmässä riippuu nimenomaisten järjestelmään kuuluvien magnetometrien herkkyydestä. Mitä herkempi magneettinen

10 ilmaisin, sitä tärkeämpää on käyttää yleistakaisinkytkentää suuren dynaamisen alueen aikaansaamiseksi. Kuviossa 4 esitetyn järjestelmän tapauksessa, joka käsittää suuren herkkyyden omaavat SQUID-magnetometrit, on edullista sisällyttää järjestelmään kokonaistakaisinkytkentä. Järjestelmään voi kuitenkin kuulua muita magneettisia ilmaisimia, esimerkiksi fluxgate-laitteita, Hall-antureita tai magnetoresist

15 tiivisiä laitteita, jotka ovat tyypillisesti vähemmän herkkiä kuin SQUID-magnetometrit mutta voivat olla riittävän herkkiä tiettyihin sovelluksiin.

Jos järjestelmään sisältyy vähemmän herkkiä magnetometrejä ja jos tarvitaan pienempää dynaamista aluetta, niin järjestelmää voidaan käyttää ilman yleistakaisinkytkentää. Tässä tapauksessa magnetometrien ulostulot syötetään ASPAlle adaptiivista signaalin balansointia varten, kuten edellä selitettiin, mistä tarvittava magneettikentän gradientti tai kokonaiskenttäinformaatio voidaan tulostaa.

20

Jos järjestelmään sisältyy SQUID-magnetometrejä, niitä täytyy käyttää kryogeenisessä ympäristössä (esim. kryostaatissa, joka sisältää nestetyppeä tai -heliumia) SQUIDien pitämiseksi sopivan matalassa lämpötilassa. Paikalliset takaisinkytkentäkelat voidaan yhdentää SQUID-magnetometrien siruille, joiden mitta tyypillisesti on

25 10 mm ja 50 mm välillä. Paikalliset takaisinkytkentäkelat järjestävät vuolukituksen SQUIDille. Sisäkkäisten takaisinkytkentäsilrukoiden kahden ryhmän käyttäminen toteuttaa pienen kohinan ja tarkan erotuskyvyn vaatimuksen kenttägradientin mittaustarkoituksissa samalla kun saadaan aikaan riittävä dynaaminen alue ulommassa

30 yleistakaisinkytkentäsilrukassa maan magneettikentän käsittelemiseksi.

Vaihtoehtoisessa suoritusmuodossa järjestelmää voidaan käyttää mittaamaan magneettikentän toisen tai korkeamman kertaluvun gradienttikomponentteja (ts. d^2B_x/dx^2 , d^2B_y/dy^2 jne.). Esimerkiksi kuviossa 5 esitetyt kaksi magnetometriä voidaan korvata kolmella magnetometrillä, jotka orientoidaan olennaisesti samaan

35 suuntaan ja sijoitetaan tasavälein $B_{x1:n}$, $B_{x2:n}$ ja $B_{x3:n}$ mittaamiseksi. Kolme ulostu-

loa voitaisiin laskea yhteen ja integroida tarvittavan yleistakaisinkytkennän järjestämiseksi. Tarvittava lineaarinen yhdistelmä $\partial^2 B_x / \partial x^2$:n mittaamiseksi on $B_{x1} - 2B_{x2} + B_{x3}$, joka saadaan helposti valitsemalla ASPAssa sopiva rajoitus. Tämä kokoonpano voidaan laajentaa monen akselin järjestelmäksi. Erityisesti järjestelmä

5 magneettikentän toisen tai korkeamman asteen gradienttien mittaamiseksi voi olla hyödyllinen sellaisissa sovelluksissa, jotka vaativat poikkeuksellisen suurta ulkoisten häiriöiden vaimennusta, kuten esimerkiksi lääketieteellisissä skannaussovelluksissa.

Joissakin sovelluksissa yleistakaisinkytkentäkelat voivat olla olennaisesti suurempia

10 kuin magnetometriryhmä. Tämä konfiguraatio olisi hyödyllinen, mikäli mitattavien gradienttikenttien lähde on hyvin lähellä magnetometriryhmää. Esimerkki tästä on biomagneettisessa ilmaisinjärjestelmässä. Esimerkiksi kuvion 9 mukaan ihmissubjektia 50 huoneessa 55 voidaan tutkia magnetismin määrittämiseksi käyttäen magnetometri-

15 sovitelmassa yleistakaisinkytkentäkelat 30a, 30b, 30c ympäröivät ihmissubjektia 50 ja magnetometrejä 25. Yleistakaisinkytkentäkelat 30a, 30b, 30c on sovitettu kolmeen olennaisesti ortogonaaliseen tasoon ja ne saavat aikaan olennaisesti tasaisen magneettikentän magneettisten ilmaisimien 25 kohdalle. Lisäksi yleistakaisinkytkentäkelaryhmät 60a, 60b, 60c voidaan konfiguroida takaisinkytkemään magneettikentän ensimmäisen kertaluvun gradientit (selvyyden vuoksi kelaryhmän 60c etum-

20 maisinta komponenttia ei ole esitetty, ja ihmissubjekti 50 peittää osan takimmaisesta komponentista). Toiminnan aikana ulostulot magneettisista ilmaisimista käsitellään edellä selitettyä adaptiivista signaalinkäsittelytekniikkaa käyttäen.

Tunnetuissa biomagneettisissa järjestelmissä mittauksia on tehty kalliissa magneettisesti suojatussa huoneessa. Kuviossa 9 esitettävässä sovitelmassa yleistakaisinkytkentäkelat 30a, 30b, 30c korvaavat tämän magneettisesti suojatun huoneen. Yleistakaisinkytkentäkelat voidaan konfiguroida takaisinkytkemään tasainen magneettikenttä ja myös magneettikentän ensimmäisen kertaluvun gradientit. Tämä saa aikaan ulkoisten kenttälähteiden olennaisen vaimennuksen.

30 Yleisesti ottaen järjestelmää voidaan käyttää useissa sovelluksissa, joissa tarvitaan magneettikentän ilmaisua. Järjestelmä voi olla erityisen hyödyllinen käytettäväksi esimerkiksi geologisessa tutkimuksessa, ei-tuhoavassa evaluoinnissa tai lääketieteellisissä sovelluksissa, kuten esimerkiksi biomagneettisessa skannauksessa.

Patenttivaatimukset

1. Järjestelmä magneettikentän yhden tai useamman gradienttikomponentin mittaamiseksi, joka järjestelmä käsittää:
 - 5 (i) vähintään kaksi magneettista ilmaisinta (25a, 25b), jotka ilmaisevat magneettikentän, jolloin kukin ilmaisim kehittää ilmaisulostulon, joilla mainituilla ilmaisulostuloilla on niihin liittyvä kokonaisenergia E, ja jolloin vähintään kaksi ilmaisimista on sovitettu ilmaisemaan magneettikenttä olennaisesti samassa suunnassa, ja
 - (ii) välineet ilmaisulostulojen (31, 32, 30a, 30b) adaptiivisen signaalinkäsittelyn suorittamiseksi siten, että järjestelmä on adaptiivisesti balansoitu, jolloin mainitut
 10 välineet kehittävät magneettikentän yhden tai useamman gradienttikomponentin,

tunnettu siitä, että

 - (iii) järjestelmä käsittää yleistakaisinkytkentävälineet (30a, 30b) olennaisesti tasaisen magneettikentän aikaansaamiseksi mainittujen kahden tai useamman magneettisen ilmaisimen kohdalla, ja
 - 15 (iv) adaptiiviset signaalinkäsittelyvälineet käsittävät välineet (34a, 34b, 35) ilmaisulostulojen kokonaisenergian E minimoimiseksi rajoituksen alaisena, jolloin rajoitus määrää, mikä yhdestä tai useammasta magneettikentän gradienttikomponentista tuotetaan.
2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, jossa välineet (34a, 34b, 35) ilmaisulostulojen kokonaisenergian E minimoimiseksi voivat myös tuottaa kokonaismagneettikentän mittausravon, jolloin rajoitus määrää, mikä yhdestä tai useammasta magneettikentän gradienttikomponentista tai kokonaismagneettikentän mittausravosta tuotetaan.
3. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, jossa adaptiiviset signaalinkäsittelyvälineet sisältävät tietokoneen (34a, 34b, 35), johon on ladattu adaptiivinen signaalinkäsittelyalgoritmi (ASPA, adaptive signal processing algorithm).
4. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, jossa yleistakaisinkytkentävälineet (30a, 30b) on sovitettu aikaansaamaan olennaisesti yhtenäinen magneettikentän gradientti mainittujen kahden tai useamman magneettisen ilmaisimen kohdalla.
- 30 5. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, jossa yleistakaisinkytkentävälineet käsittävät vähintään yhden yleistakaisinkytkentäkelaryhmän (30a, 30b).

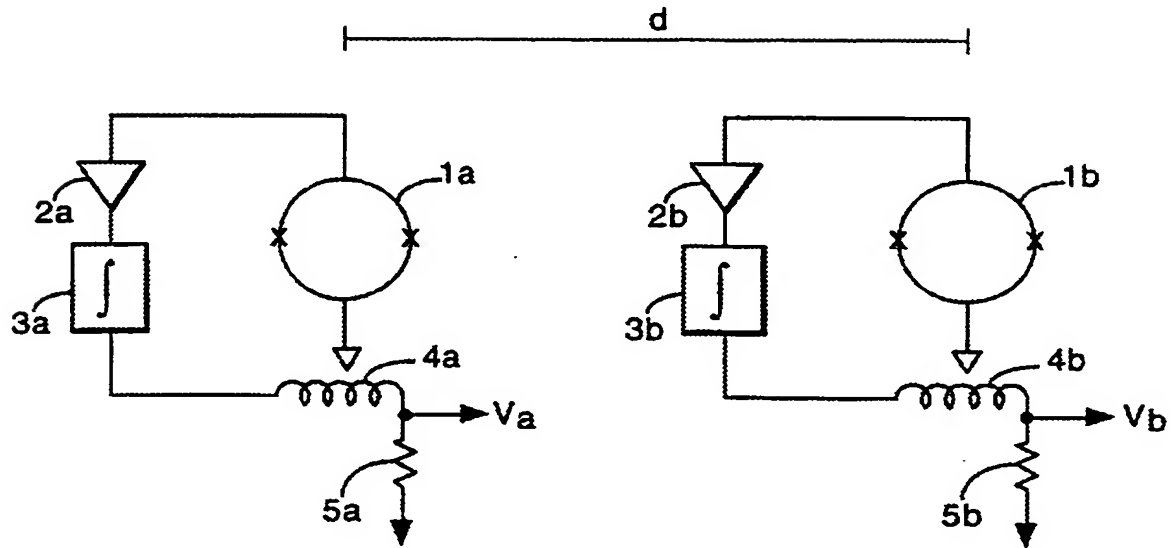
6. Patenttivaatimuksen 5 mukainen järjestelmä, jossa kukin mainituista yhdestä tai useammasta yleistakaisinkytkentäkelaryhmästä käsittää kaksi tai useampia kuin kaksi Helmholtzin kela (30a, 30b, 30c).
7. Patenttivaatimuksen 6 mukainen järjestelmä, joka käsittää myös:
- 5 välineet vähintään yhden erosignaalin kehittämiseksi kahden ilmaisulostulon välillä, jolloin mainitut ilmaisulostulot vastaavat kukin magneettikenttää olennaisesti samassa suunnassa, ja
- analogi-digitaalimuunnosvälineet (35) mainitun yhden tai useamman erosignaalin ja mainittujen kahden tai useamman ilmaisulostulon muuntamiseksi vastaavaksi
- 10 digitaaliseksi dataksi.
8. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, jossa vähintään yksi magneettista ilmaisimista on mikä tahansa seuraavista: fluxgate-ilmaisim, Hall-anturi-ilmaisim tai magnetoresisttiivinen ilmaisim.
9. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, jossa vähintään yksi magneettista ilmaisimista on SQUID-magnetometri.
- 15
10. Patenttivaatimuksen 9 mukainen järjestelmä, joka käsittää myös jäähdytysvälineet SQUID-magnetometrin lämpötilan alentamiseksi.
11. Patenttivaatimuksen 10 mukainen järjestelmä, jossa kussakin SQUID-magnetometrissä on siihen liittyvät paikallistakaisinkytkentävälineet (26a, 26b) magneettivuon olennaisesti vakion tilan ylläpitämiseksi asianomaisessa SQUID-magnetometrissä.
- 20
12. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, joka käsittää:
- vähintään neljä magneettista ilmaisinta magneettikentän ilmaisemiseksi, jolloin kolme ilmaisimista on sovitettu siten, että ne ilmaisevat magneettikentän kolmessa
- 25 olennaisesti ortogonaalisessa suunnassa, ja jolloin vähintään kaksi mainituista ilmaisimista on sovitettu siten, että ne ilmaisevat magneettikentän olennaisesti samassa suunnassa.
13. Patenttivaatimuksen 12 mukainen järjestelmä, joka käsittää vähintään kahdeksan magneettista ilmaisinta.

14. Patenttivaatimuksen 13 mukainen järjestelmä, jossa mainitut kahdeksan tai useammat kuin kahdeksan magneettista ilmaisinta on sovitettu tetraedrarakenteen kärkipisteisiin.
- 5 15. Patenttivaatimuksen 14 mukainen järjestelmä, jossa yleistakaisinkytkentävälineet käsittävät kolme yleistakaisinkytkentäkelaryhmää (30a, 30b, 30c), jotka on orientoitu kolmeen olennaisesti ortogonaaliseen suuntaan, olennaisesti tasaisen magneettikentän kehittämiseksi kunkin kahdeksan tai useamman magneettisen ilmaisimen kohdalla.
- 10 16. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, joka käsittää vähintään kolme magneettista ilmaisinta, jolloin vähintään kolme ilmaisimista on orientoitu olennaisesti samaan suuntaan ja jolloin välineet, jotka suorittavat adaptiivisen signaalinkäsittelyn, voivat kehittää magneettikentän vähintään toisen kertaluvun gradienttikomponentin.
- 15 17. Patenttivaatimuksen 1 mukainen järjestelmä, jossa mukainen järjestelmä on sovitettu saamaan aikaan biomagneettinen ilmaisujärjestelmä (55).
- 20 18. Patenttivaatimuksen 17 mukainen järjestelmä, jossa yleistakaisinkytkentävälineet käsittävät vähintään yhden yleistakaisinkytkentäkelaryhmän (30a, 30b tai 30c), joka on sovitettu ympäröimään mitattavan magneettikentän kehittävää subjektia (50), jolloin subjekti (50) on aivan kahden tai useamman magneettisen ilmaisimen (25) lähellä.
19. Menetelmä magneettikentän vähintään yhden gradienttikomponentin mittaamiseksi gradiometriä käyttäen, joka menetelmä käsittää seuraavat vaiheet:
- (i) ilmaistaan magneettikentän komponentti kahdessa tai useammassa paikassa kahta tai useampaa magneettista ilmaisinta (25a, 25b) käyttäen, jolloin vähintään 25 kaksi magneettikentän komponenttia ilmaistaan olennaisesti samassa suunnassa,
- (ii) tuotetaan kaksi tai useampia kuin kaksi lähtösignaalia, joilla on niihin liittyvä kokonaisenergia E, joka vastaa mainittuja magneettikentän komponentteja,
- (iii) järjestetään yleistakaisinkytkentä olennaisesti tasaisen magneettikentän muodossa mainittujen kahden tai useamman magneettisen ilmaisimen (25a, 25b) kohdal-
30 la,

- (iv) suoritetaan lähtösignaalien adaptiivinen signaalinkäsittely ja minimoidaan lähtösignaalien kokonaisenergia E , rajoituksen alaisena siten, että gradiometri on adaptiivisesti balansoitu,
 - (v) rajoitetaan kokonaisenergian E minimointi siten, että tuotetaan magneettikentän gradienttikomponentti, ja
 - (vi) tuotetaan vähintään yksi magneettikentän gradienttikomponentin mittaussarvo.
20. Patenttivaatimuksen 19 mukainen menetelmä, joka käsittää seuraavat vaiheet:
- (i) minimoidaan lähtösignaalien kokonaisenergia E rajoituksen alaisena siten, että gradiometri on adaptiivisesti balansoitu, ja
 - (ii) rajoitetaan kokonaisenergian E minimointi siten, että tuotetaan kokonaismagneettikentän mittaussarvo.
21. Patenttivaatimuksen 19 mukainen menetelmä, jossa magneettikentän komponentit kahdessa tai useammassa paikassa ilmaistaan kahta tai useampaa magneettista ilmaisinta (25a, 25b) käyttäen ja joka käsittää lisäksi vaiheen, jossa järjestetään olennaisesti yhtenäinen magneettikentän gradientti mainittujen kahden tai useamman magneettisen ilmaisimen kohdalla.
22. Patenttivaatimuksen 21 mukainen menetelmä magneettikentän komponenttien mittaamiseksi ihmissubjektissa (50) aivan mainittujen kahden tai useamman magneettisen ilmaisimen (25) lähellä.
23. Patenttivaatimuksen 19 mukainen menetelmä, joka käsittää seuraavat vaiheet:
- (i) ilmaistaan magneettikentän komponentti kahdessa tai useammassa paikassa, jolloin vähintään kolme mainituista magneettikentän komponenteista ilmaistaan olennaisesti samassa suunnassa,
 - (ii) minimoidaan lähtösignaalien kokonaisenergia E rajoituksen alaisena siten, että gradiometri on adaptiivisesti balansoitu, ja
 - (iii) rajoitetaan kokonaisenergian E minimointi siten, että tuotetaan magneettikentän vähintään toisen kertaluvun gradienttikomponentti.

Fig.1.

TEKNIKAN TASO

**Fig.2.**

TEKNIKAN TASO

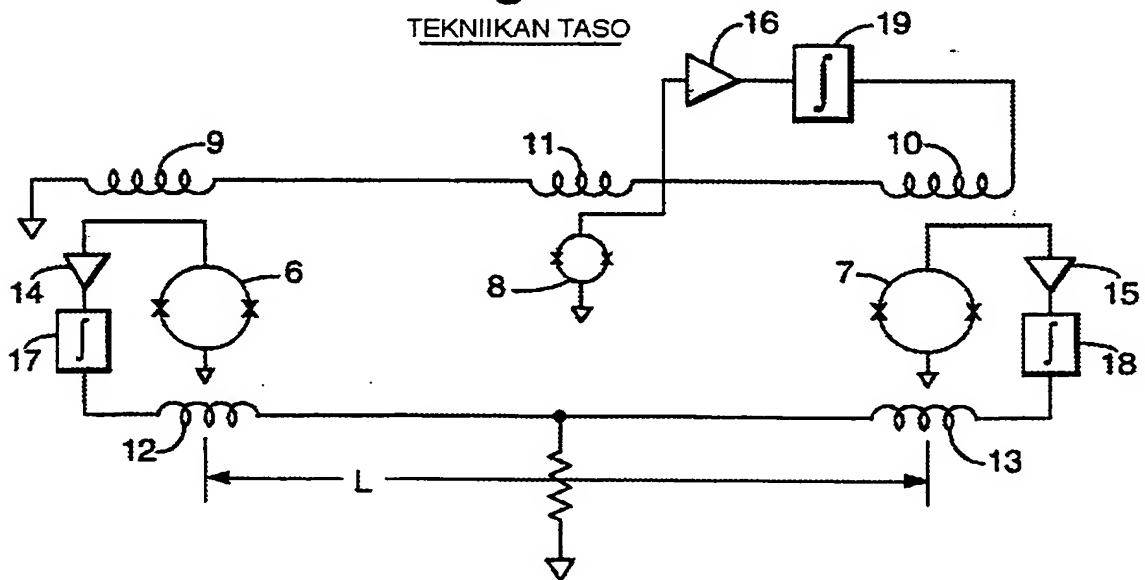


Fig.3.

TEKNIKAN TASO

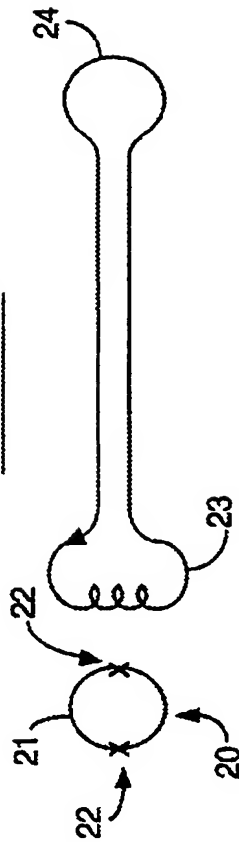


Fig.4.

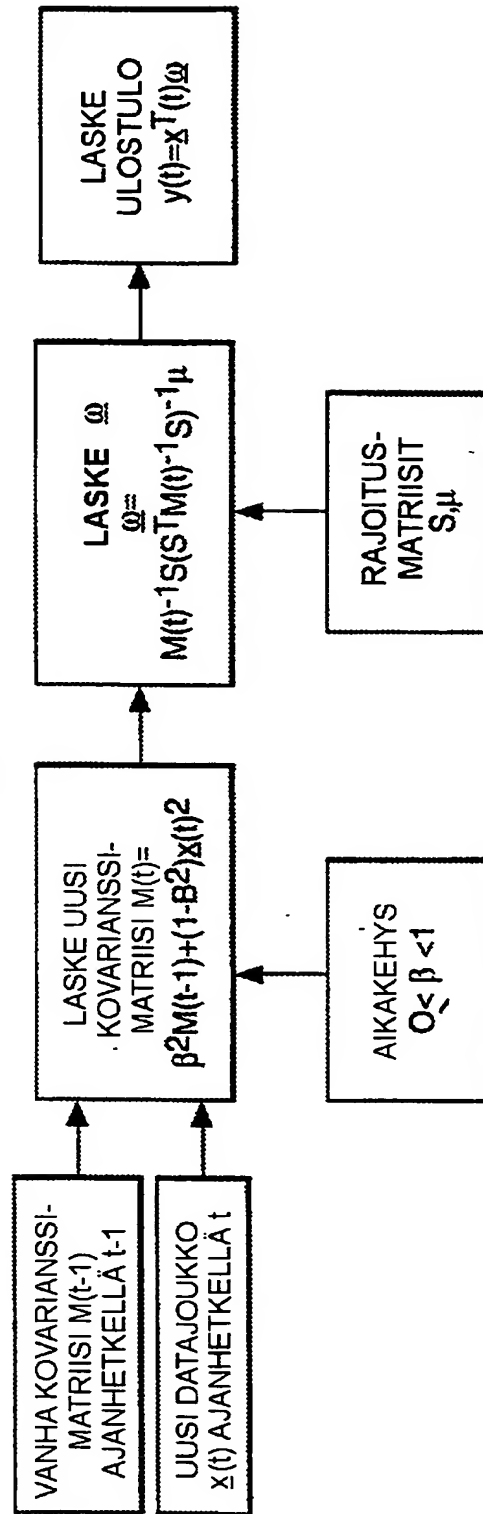


Fig.5.

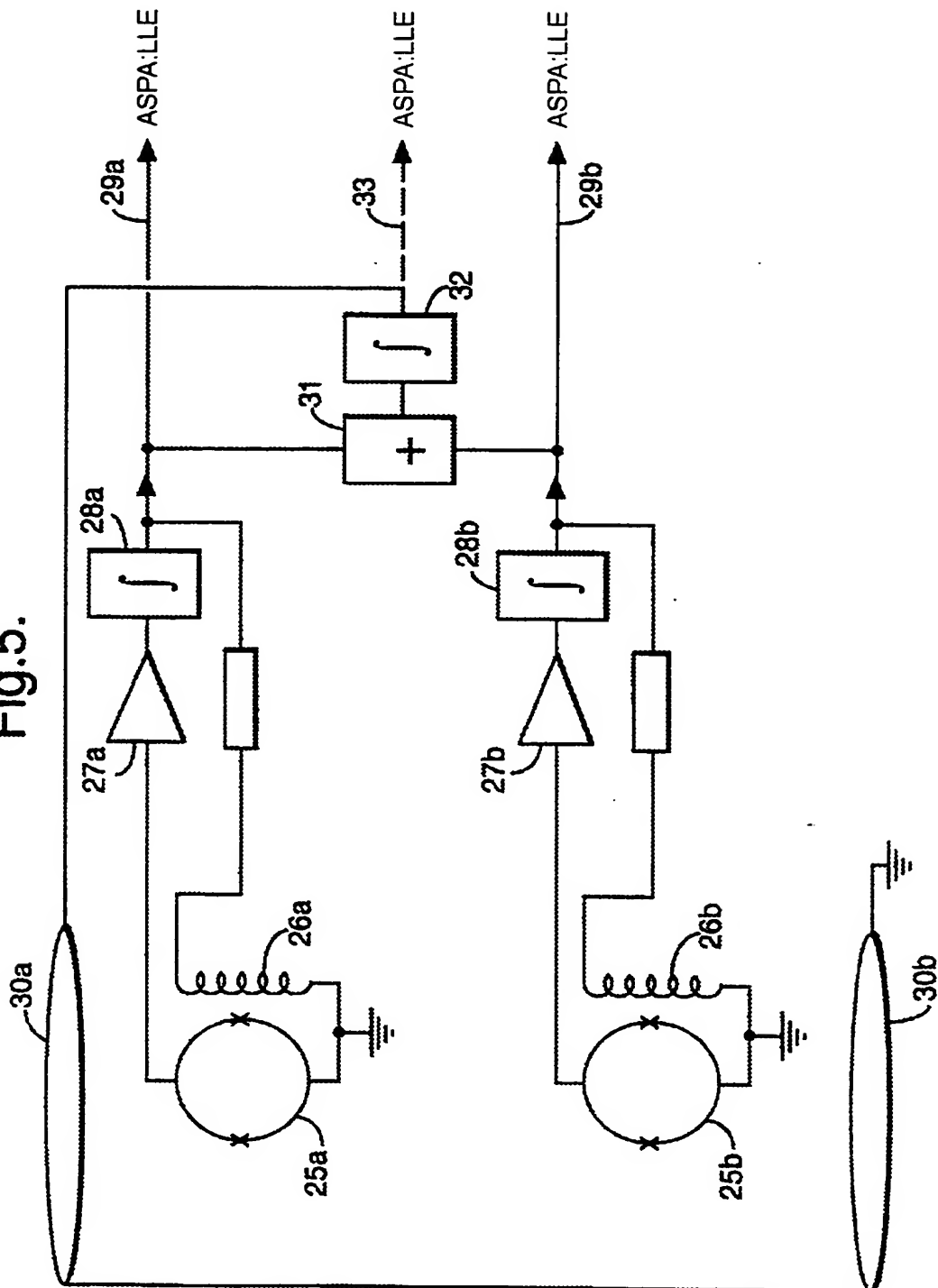


Fig.6.

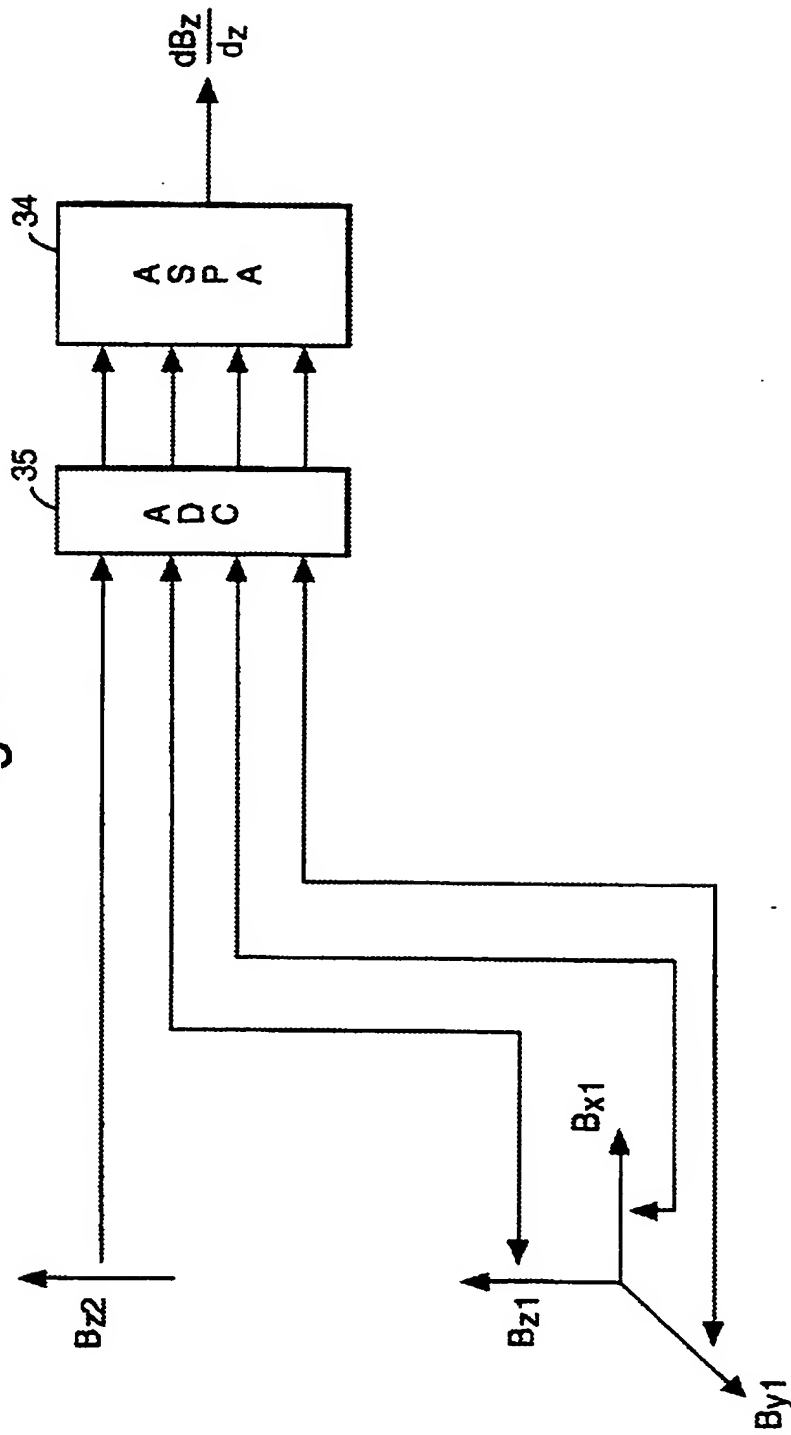
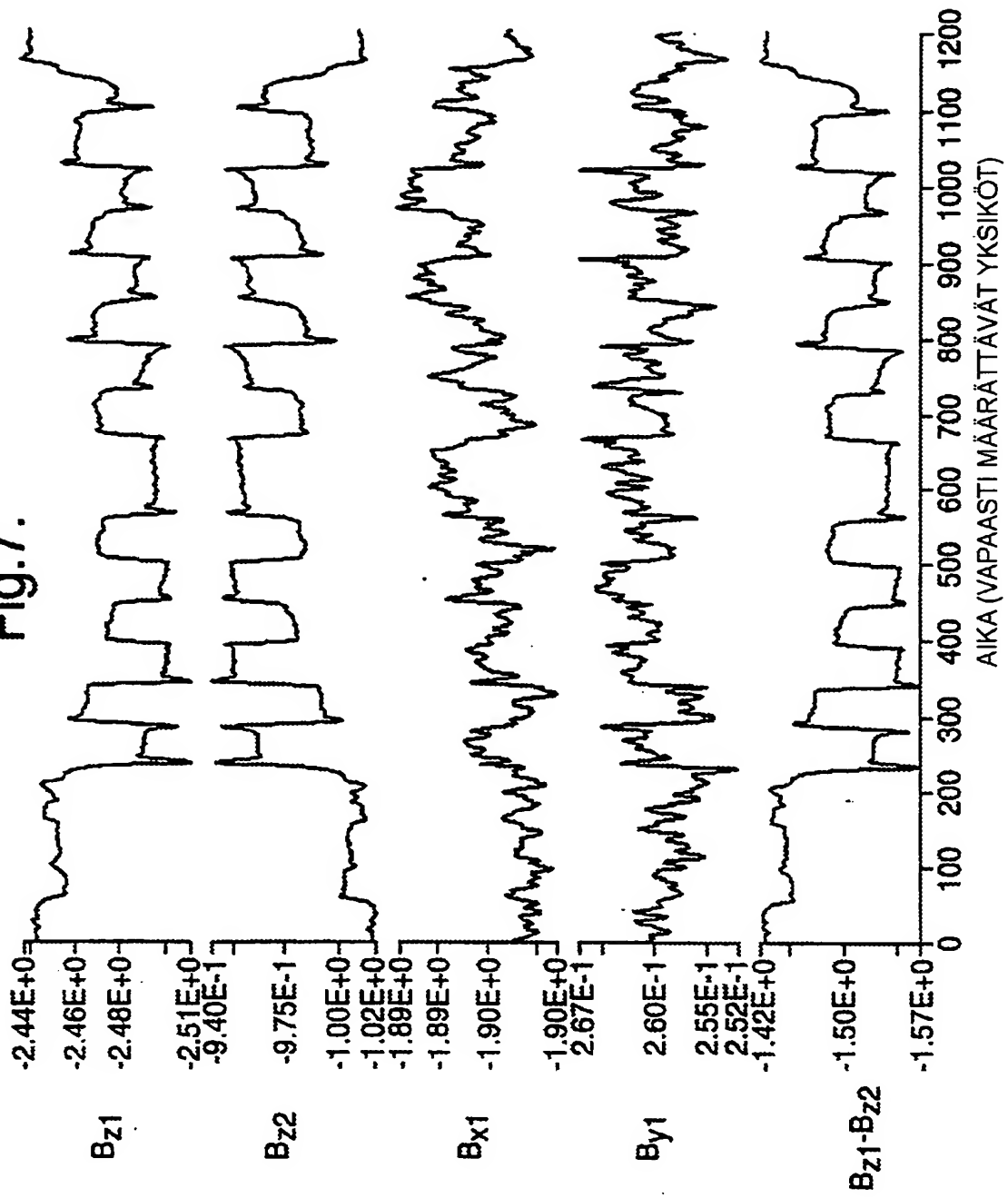


Fig.7.



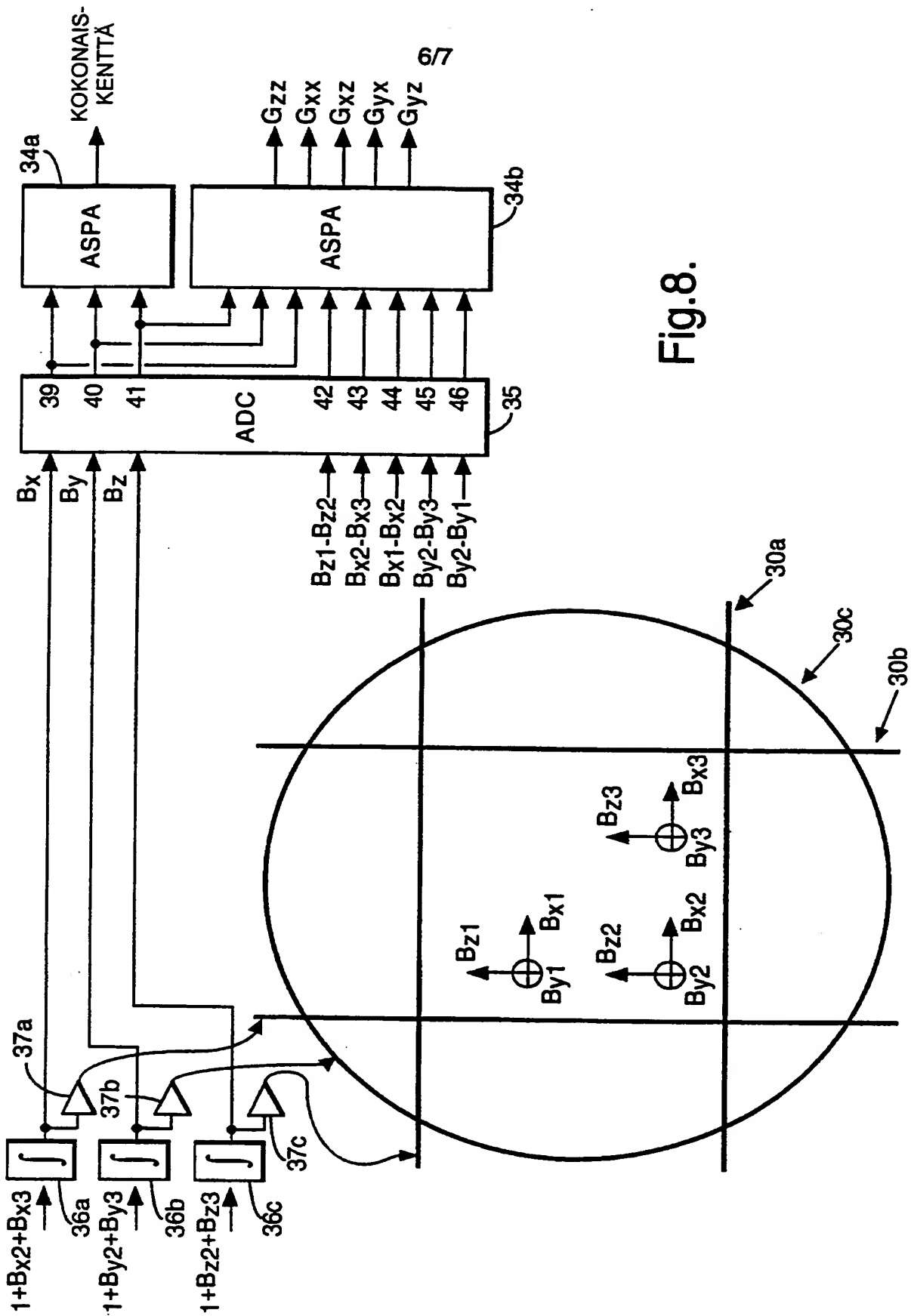
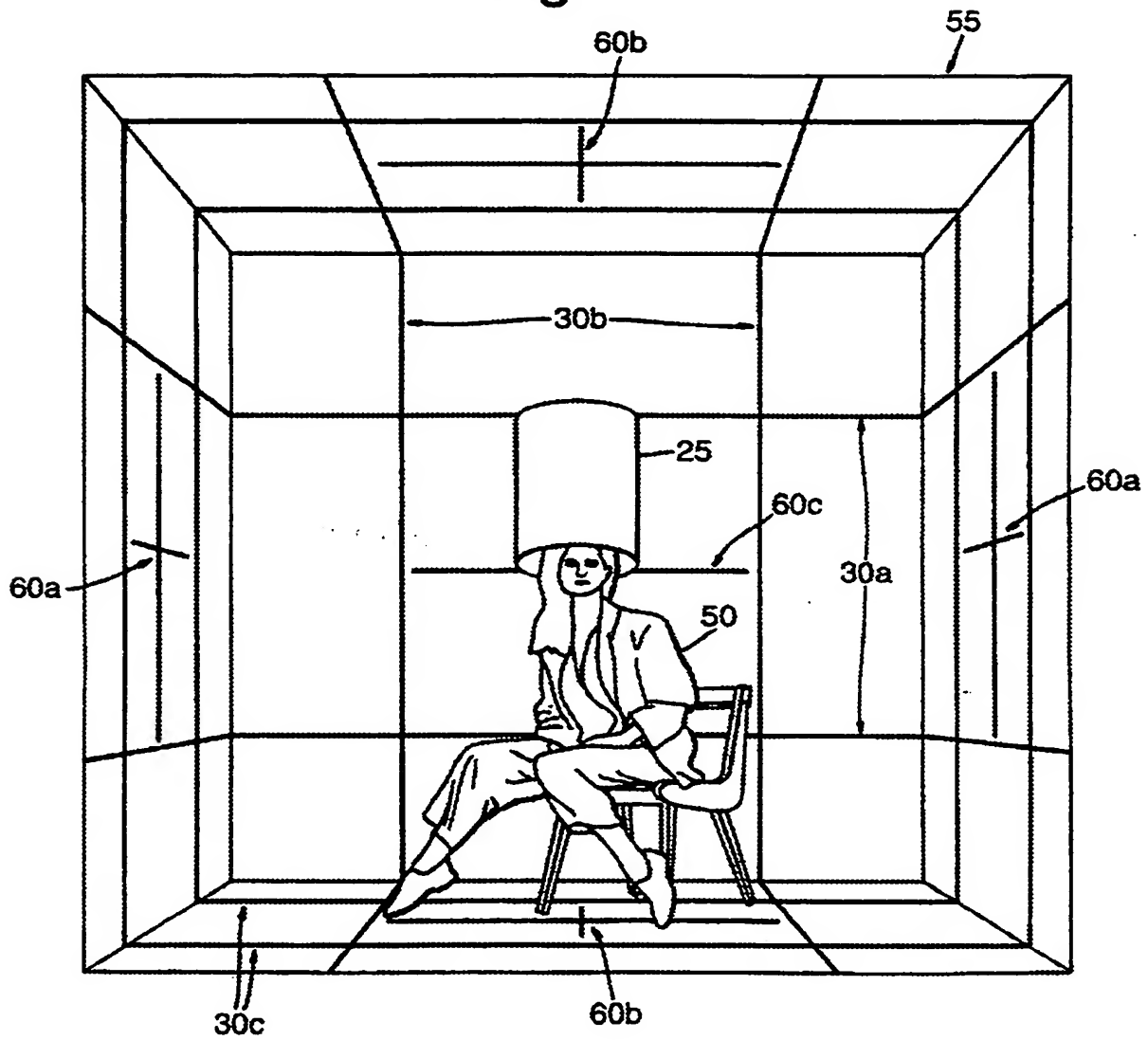


Fig.8.

Fig.9



THIS PAGE BLANK (USPTO)